

文章编号: 1001-1986(2017)01-0056-06

沁水盆地柿庄北区块3号煤层裂缝预测

付晓龙¹, 戴俊生¹, 张丹丹², 邹娟³, 徐珂¹

(1. 中国石油大学(华东)地球科学与技术学院, 山东 青岛 266580; 2. 中国石油大庆油田有限责任公司, 黑龙江 大庆 163002; 3. 中国石油冀东油田公司勘探开发研究院, 河北 唐山 063004)

摘要: 柿庄北地区位于沁水盆地东南部, 是我国重要的煤层气产区。煤层裂缝作为主要的渗流通道, 对煤层气高产富集起到重要控制作用。该区山西组3号煤层中褶皱轴部走向为近南北向, 野外露头区发育一组共轭剪裂缝, 优势方位为NW与近EW向, 其次是近SN向。根据构造形迹确定燕山期应力场以SEE105°挤压为主。利用水力加砂压裂法对现今井点目的层地应力进行计算, 通过古地磁定向与声速各向异性确定现今最大水平主应力方向为NE55°。将煤层构造与地表起伏形态作为主要影响因素, 采用有限元法对燕山期及现今地应力场进行数值模拟, 利用弹性力学理论对裂缝参数进行计算, 计算结果认为柿庄北3号裂缝孔隙度、渗透率普遍较小, 整体上中部背斜区>中部平缓区>东部单斜区>中部向斜区>西部地区。模拟的裂隙特征与实测数据所反映的裂隙特征相近, 单井产气量高的地区, 裂隙较发育。

关 键 词: 柿庄北; 裂缝; 应力场; 孔隙度; 渗透率

中图分类号: P618.11 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-1986.2017.01.011

Prediction of fractures of seam No.3 in northern Shizhuang, Qinshui basin

FU Xiaolong¹, DAI Junsheng¹, ZHANG Dandan², ZOU Juan³, XU Ke¹

(1. School of Geosciences, China University of Petroleum (East China), Qingdao 266580, China;

2. Petrochina Daqing Oilfield Company, Daqing 163002, China;

3. Research Institute of Exploration and Development, Petrochina Jidong Oilfield Company, Tangshan 063004, China)

Abstract: Northern Shizhuang, an important area for CBM production, is located in the southeast of Qinshui basin. As the primary seepage channel, fractures in coal seams make a great significance for the enrichment and production of CBM. The direction of the fold axes in seam No.3 is nearly NS, while a group of conjugate shear fractures was developed in outcrops, of which the dominant direction is NW and nearly EW, followed by nearly NS. According to the structural features, the stress field of Yanshanian was mainly compression from SEE105°. The stress in well points was calculated by using the hydraulic fracturing method, the direction of the maximum horizontal principal stress which is NE55°, was determined by restoring the original position through paleomagnetic and according to the velocity anisotropy. Considering the coal structure and surface topography as the main influencing factors, using the finite element method to simulate Yanshanian and the present stress field, and the precision is high. By using elastic mechanics theory to calculate fracture parameters, the porosity and permeability of SEAM No.3 in northern Shizhuang is generally small. In general, the porosity and permeability in central anticlinal area > central flat area > eastern monoclinic area > central synclinal area > western district, the simulation results were consistent with the measured data and single well gas production line, the credibility was high.

Keywords: northern Shizhuang; fracture; stress field; porosity; permeability

中、高煤阶煤储层具有双重孔隙结构, 煤基质孔隙作为主要的储气空间, 是煤层气吸附的主要场所,

其渗透率很低, 而煤层中普遍发育的裂隙虽然孔隙度较低, 但为流体产出提供了运移通道^[1-2]。煤层裂缝

收稿日期: 2015-03-09

基金项目: 国家科技重大专项课题(2011ZX05042-001)

Foundation item : National Science and Technology Major Project (2011ZX05042-001)

第一作者简介: 付晓龙(1989—), 男, 山东德州人, 博士, 从事油气区构造解析及构造地质学研究工作. E-mail: upcfxl@163.com

引用格式: 付晓龙, 戴俊生, 张丹丹, 等. 沁水盆地柿庄北区块3号煤层裂缝预测[J]. 煤田地质与勘探, 2017, 45(1): 56-61.

FU Xiaolong, DAI Junsheng, ZHANG Dandan, et al. Prediction of fractures of seam No.3 in northern Shizhuang, Qinshui basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2017, 45(1): 56-61.

是一项极为重要的控制煤层气高产富集因素,但由于深埋于地下,无法直接观察到裂缝的展布情况,需要通过多种方法进行裂缝的识别和预测。煤层的孔隙度、渗透率受多种因素影响^[3-5],本次研究借鉴低渗透油气藏裂缝预测方法,对沁水盆地柿庄北地区山西组3号煤层中裂缝发育特征进行分析预测,为煤层气开发井网部署及开发动态分析等提供依据。

1 研究区概况

柿庄北地区地形以山地、丘陵为主,地表起伏十分明显。构造处于沁水盆地南部斜坡带,由于经历多期构造运动,构造复杂,其中发育多个褶皱,断层相互交错但大型断层不甚发育,断层落差均不超过100 m。煤层构造整体较平缓,地层倾角一般不超过6°,但局部地区受构造影响,倾角可达15°。西部地区煤层海拔低,为一个倾向北北西的相对平缓地区;中部为构造挤压形成的隆升区,其间发育多条延伸短、落差小的小型断层,煤层海拔较高且较为平缓,而在其两侧发育有多个背斜、向斜,并且发育有延伸较长的北北东向断层;东部煤层海拔较高,为一个北西倾向、倾角稍大的单斜构造,靠近东部边缘地带有较明显的凹陷和凸起(图1)。

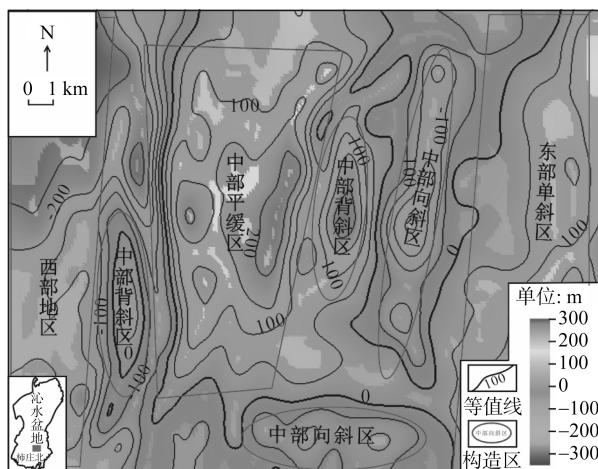


图1 沁水盆地柿庄北3号煤层构造等值线图

Fig.1 Structural contours of seam No.3 in northern Shizhuang

区内发育典型的华北石炭-二叠纪含煤地层,其中山西组的3号煤层分布范围广,煤层埋深700~1 700 m,厚度在5.6~6.6 m,平均厚度约6 m,纵向上厚度稳定,煤层气含量较高^[6]。是煤层气勘探的主要目的层。3号煤层中以黑色亮煤为主,暗煤次之,变质程度接近于无烟煤阶段^[7],割理20~26条/10 cm,非均质性强,渗透率变化很大。顶、底板以泥岩和粉砂岩为主,具有较好的封闭性,储层压力偏低,地下水动力条件差,有利于煤层气富集。

2 裂缝预测方法

地下岩石所处应力状态复杂,依据应力状态及破裂的力学性质,分别选取库仑-莫尔破裂准则和格里菲斯破裂准则对岩石破裂状态进行判别^[8]。申卫兵等^[9]对6种煤阶煤岩样品进行了三轴力学实验,应力-应变曲线主要以线性段为主,其弹性变形可持续相当长的一个阶段,因此将煤作为弹性体进行计算分析符合实际深度煤岩情况。根据弹性力学及断裂力学理论,建立裂缝参数与应力-应变的数学关系,进行岩石破裂判断并计算裂缝的开度、密度等参数。

现今应力场下不产生新裂缝,但对先期形成的裂缝进行改造。考虑正应力和剪应力的影响^[10],忽略现今应力场产生的极小的剪切位移及裂缝的残余宽度,计算得到裂缝的孔隙度、渗透率:

$$\left\{ \begin{array}{l} \phi_f = \sum_{i=1}^m b_m D_{vf} \\ K_f = \frac{\phi_f b_m^2}{12} \end{array} \right. \quad (1)$$

式中 b_m 为裂缝开度, m; D_{vf} 为裂缝体密度, m^2/m^3 ; ϕ_f 为裂缝孔隙度, %; K_f 为裂缝渗透率, m^2 。

以裂缝的微观破裂机制为基础,结合研究区的构造应力场条件,以单井参数及施工数据为检验标准,预测结果准确度较高。

3 造缝期古应力场

柿庄北地区主要出露二叠系砂岩,砂岩中裂缝发育密集,产状稳定,且不同裂缝之间的距离相等,其中存在一组较明显的X型共轭剪裂缝(图2),裂缝走向以NW和NEE向为主,其次是近南北向(图3)。野外露头区裂缝倾角较大,以高角度垂直缝为主,其中倾角70°以上的裂缝约占87%(图4)。



图2 柿庄北野外露头中裂缝发育特征示意图

Fig.2 Fracture development characteristics in outcrops of northern Shizhuang

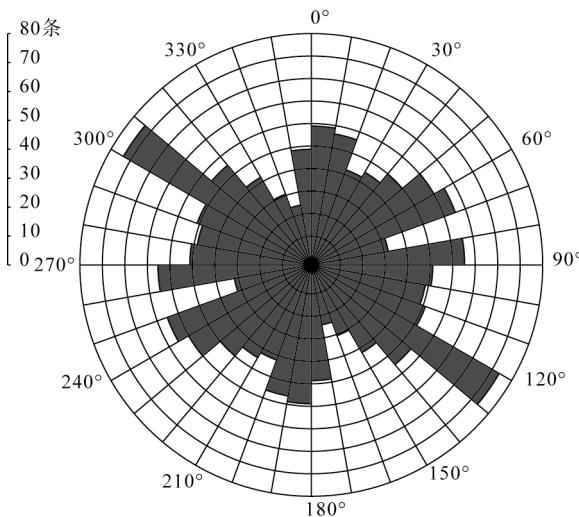


图 3 柿庄北野外露头裂缝走向玫瑰花图

Fig.3 Rose diagram of fractures in outcrops of northern Shizhuang

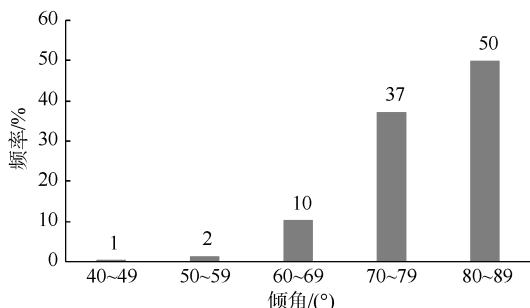


图 4 柿庄北野外露头裂缝倾角分布直方图

Fig.4 Distribution of fracture dip in outcrops of northern Shizhuang

自中生代以来，沁水盆地经历了印支期、燕山期和喜马拉雅期构造活动。在燕山期太平洋板块与亚洲板块的碰撞产生的近东西向挤压应力作用下，沁水盆地形成了宽缓的 NE 向含煤向斜构造^[11]，同时形成了近 NE、NNE 向规模较小的正断层。燕山期对柿庄北 3 号煤层构造的形成产生重要影响，是煤层裂缝形成的主要时期。

柿庄北 3 号煤层构造较平缓，倾角一般小于 6°，在此基础上发育有一系列规模、大小不等的次一级褶曲。褶皱轴部走向多为近 NS-NNE 向，区内大型断层不发育，多为延伸较短、落差小的断裂，走向与野外露头中裂缝相似。依据构造演化及构造形迹判断燕山期古应力场以近 EW 向挤压为主，最大水平主应力为 SEE105°-NWW285°。

断层对煤层整体应力分布影响较小，因此在建立地质模型时对其进行适当简化，除 2 条延伸较长的断层外，其余小断层以连续构造起伏的形态进行表示。主要考虑煤层构造形态，采用有限元法对主要造缝期(燕山期)应力场进行数值模拟。指定模型东西方向为 X 轴，南北方向为 Y 轴，垂直方向为 Z 轴，为保持模型稳定并得到收敛解答，在模型西边界施加 X 方向约束，北边界施加 Y 方向约束，模型底面施加 Z 方向约束。经过反复加载试验，最终确定在 SEE105°-NWW285°方向施加 182 MPa 挤压力，NNE15°-SSW105°方向施加 69 MPa 挤压力，得到最佳结果。

4 现今地应力

现今地应力可利用多种方法进行实际测试，其中水力压裂是较为方便直接的一种方法^[12]。通过施工数据可计算得到各井点中特定目的层段的主应力大小(表 1)。

最小水平主应力：

$$h = P_c \quad (2)$$

最大水平主应力：

$$H = 3 h - P_f - P_0 + S_t \quad (3)$$

式中 P_c 为闭合压力，MPa； P_f 为破裂压力，MPa； P_0 为储层压力，MPa； S_t 为岩石抗张强度，MPa。

由于该区煤岩易破碎，直接钻井取心难度较大，考虑到相邻地层中地应力场的统一性，选取邻近地

表 1 水力压裂法计算主应力结果

Table1 Results of principal stresses calculated through hydraulic fracturing method

井号	深度/m	h /MPa	H /MPa	井号	深度/m	h /MPa	H /MPa	井号	深度/m	h /MPa	H /MPa
SX 149	736.30	17.40	25.14	SX 126	835.00	17.50	25.75	SX 127	859.30	18.08	27.93
SX 122	745.70	17.00	24.58	SX 013-1	1 002.00	19.50	26.77	SX 006-3	956.60	19.21	27.40
SX 002	1 067.30	21.58	28.63	SX 132	879.00	20.59	27.63	SX 006-6	1 016.00	20.80	27.29
SX 006-1	976.25	19.66	27.07	SX 010	1 345.50	23.20	31.74	SX 135	940.40	20.60	27.78
SX020-2	942.70	20.96	26.38	SX 004-1	752.50	17.27	26.02	SX 123	804.97	19.50	25.83
SX 134	850.40	19.70	25.44	SX 133	804.00	18.59	24.08	SX 006-4	984.70	19.30	28.27
SX 131	937.80	19.82	26.58	SX 009	1 127.40	22.33	27.23	SX 020	952.80	21.08	23.91
SX 006-5	996.50	18.98	25.63	SX 006-7	968.70	21.40	28.86				

层中砂岩样品进行室内试验分析。岩心脱离地下三向应力环境后产生微裂缝，通过古地磁法恢复岩心在地下的原始方位^[13]，根据岩心中各方向的声速差异确定微裂缝优势方向，声速最大方向即为最小水平主应力的方向^[14]。由于岩性组成的差异，多个典型样品的声速测试数值各不相同，但最小值指示均为NE向，确定现今以NE向挤压为主(图5)，最大水平主应力方向平均为NE55°。

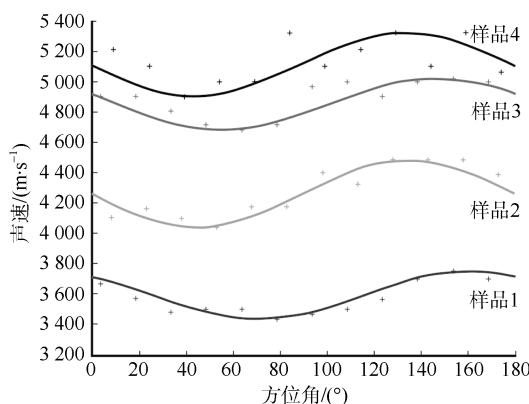


图5 柿庄北岩石样品声速各向异性结果图

Fig.5 Velocity anisotropy of the samples of northern Shizhuang

柿庄北地区3号煤层现今模型与燕山期古模型的最大区别在于埋深。研究区地形以山地、丘陵为主，埋深700~1700 m，变化范围较大。山脊总体沿NW-SE方向延伸，向两侧海拔逐渐降低。埋深是影响地应力分布的一个重要因素，因此在煤层之上建立以实际海拔为基准的地表形态，模拟真实埋深。

以实际单井数据为拟合标准，通过不断加载试验提高模拟准确性。最终确定在模型NE55°-SW235°施加88 MPa挤压力，SE145°-NW325°施加27 MPa挤压力，最终结果误差均不超过15%(图6)。

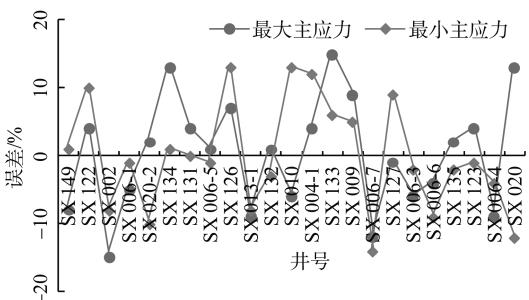


图6 柿庄北3号煤层现今地应力模拟结果误差

Fig.6 Error of present in-situ stress simulation results of seam No.3 of northern Shizhuang

5 煤层裂隙数值模拟

燕山期是煤层裂隙形成的主要时期，现今地应力场对裂隙进行后期改造。在燕山期古应力场与现今地

应力场数值模拟的基础上，进行煤层裂隙参数的计算。

裂隙孔隙度是指裂隙孔隙体积与岩石总体积的比值，是表征裂隙发育程度的一个重要参数。由于煤层易碎，煤样脱离原始地层条件后孔隙条件发生变化，因此采集较完整的煤样进行试验分析。由试验数据得到的煤岩孔隙度为总孔隙度，需转换为裂隙孔隙度进行分析。管俊芳等^[15]对煤样实验测试统计发现，煤层割理孔隙度在总孔隙度中仅占10%~18%，且煤阶越高此比例越小。沁水盆地3号煤的镜质体反射率在1.3%~3.9%，平均2.47%，而柿庄北地区煤岩镜质体反射率最高可达到3.2%左右^[17]，煤岩变质程度不均。本次研究中认为裂隙孔隙度占总孔隙度的15%，通过统计各井点计算数据，模拟结果与测井孔隙度误差在允许范围(20%)以内，模拟可信度较高(表2)。

表2 柿庄北3号煤层孔隙度及模拟误差

Table 2 Porosity and error of simulation of seam No.3 in northern Shizhuang

编号	井号	埋深/m	总孔隙度/%	裂隙孔隙度/%		
				实测	数值模拟	相对误差
1	SX 002	1 088.08	4.87	0.730 5	0.733 22	0
2	SX 003	1 196.29	6~7.143	0.900 0	0.778 36	-14
3	SX 004	1 040.35	9.825	1.473 75	1.338 42	-9
4	SX 006	1 037.35	5.2~5.41	0.811 5	0.808 965	0
5	SX 008	11 64.42	5.806~5.81	0.871 5	0.933 17	7
6	SX 009	1 040.07	5.263	0.789 45	0.695 165	-12
7	SX 010	11 64.99	5.096~5.882	0.764 4	0.624 155	-18
8	SX 013	982.92	5.882~6.41	0.961 5	1.010 905	5
9	SX 013-1	979.62	5.88~6.41	0.961 5	0.946 41	-2
10	SX 014	1 099.23	3.92~4.67	0.700 5	0.807 08	15
11	SX 016	1 093.87	3.92~3.97	0.595 5	0.625 01	5
12	SX 017	969.73	4.7	0.705 0	0.825 165	17
13	SX 018	979.93	4.73~6.58	0.709 5	0.729 845	3
14	SX 025	1 147.68	5.755~6.164	0.924 6	1.015 15	10

煤层渗透率通常采用注入/压降试井分析的方法及取样测试进行测定，根据实测结果，柿庄北地区3号煤层渗透率较低，大多分布在 $(0.01\sim0.03)\times10^3\mu\text{m}^2$ 。由于研究区内仅有的少量测试结果不足以进行整体的对比分析，模拟结果与实测数据同在一个数量级。煤层经历构造活动导致不同程度的变形，破裂压力一定程度上可反映煤层构造程度，该区构造煤发育导致破裂压力较大，而渗透率则较小^[18]。模拟结果中各井点的渗透率随破裂压力增大而减小(图7)，与研究区中二者实际变化关系一致，认为模拟结果较为可靠。

3号煤层裂隙孔隙度、渗透率普遍较小，且发育程度十分不均(图8，图9)。孔隙度0.4%~1.2%的地区占90.2%，大部分地区渗透率 $<0.6\times10^{-3}\mu\text{m}^2$ ，

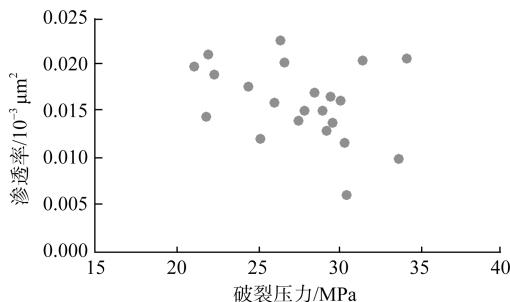


图 7 破裂压力与渗透率关系图

Fig.7 Relationship between fracture pressure and permeability

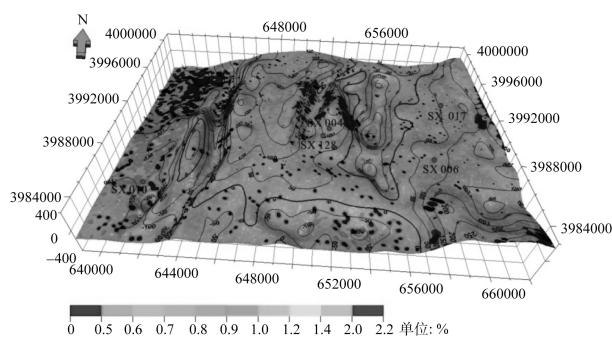


图 8 柿庄北 3 号煤层裂缝孔隙度数值模拟结果

Fig.8 Results of porosity numerical simulation of seam No.3 in northern Shizhuang

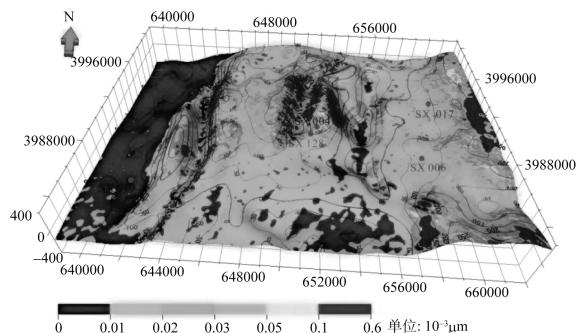


图 9 柿庄北 3 号煤层裂缝渗透率数值模拟结果

Fig.9 Results of numerical simulation of fracture permeability of seam No.3 in northern Shizhuang

其中小于 $0.025 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 的地区占 73%，因此，虽然柿庄北 3 号煤层厚度大而稳定、含气量高，但孔渗条件总体并不好，开采难度较大。孔隙度、渗透率分布呈现明显的分区特点，西部地区孔隙度、渗透率较小，中、东部地区裂缝发育程度相对较高，孔隙度、渗透率相对较大。孔隙度、渗透率的分布与构造的关系密切。

a. 中部背斜区 孔隙度整体在 0.9% 以上，在轴部达到 1.2%，东西两侧翼部裂缝最发育，可超过 1.4%；渗透率普遍大于 $0.05 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，翼部可大于 $0.1 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。但不可忽略的是背斜南部斜坡中孔渗较小，在背斜中也零星分布有孔渗的低值，这种近于突变的分布给煤层气开发带来较大的困难。

b. 中部平缓区 以两条延伸较远的较大型断层为界，虽然区域内煤层构造平缓，没有较大规模的褶皱，但延伸短、落差小的小型断层较为发育，孔隙度普遍在 0.9% 以上，渗透率在 $0.2 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上。靠近边界处孔隙度较大，在断层内部孔隙度较大，与背斜翼部相当。

c. 东部单斜区 孔隙度较高，多在 0.8% 以上，零星有小范围地区孔隙度小于 0.5%；渗透率大多在 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 以上。在东部边缘煤层构造起伏较为明显处，孔隙度、渗透率增大。

d. 中部向斜区 在背斜东侧发育连续的多个小型向斜，其内部受到强烈挤压，裂缝呈紧闭状态，除翼部斜坡上小范围孔隙度达到 1.0%，多数在 0.7% 以下。渗透率一般小于 $0.02 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，仅在翼部小范围内可达到 0.05 左右，向斜中心渗透率极低，多数小于 $0.01 \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ 。

e. 西部 特别是西北部地区，煤层平缓，构造起伏不明显，一般不发育裂缝，孔隙度普遍小于 0.5%，渗透率极小。

煤层气产量对孔隙度、渗透率极为敏感，特别是煤层渗透率^[19]，通过典型生产井排采数据分析，单井产气量与煤层裂缝孔隙度、渗透率模拟结果具有较好的一致性。

SX 017 与 SX 006 井组位于东部地区，煤层孔隙度 0.7%~1.0%，渗透率 $(0.02 \sim 0.05) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，煤层的单井产气量在 $400 \text{ m}^3/\text{d}$ 以上。SX004 井组位于中部地区，井数量多，但多数位于背斜南部斜坡，并未到达轴部或翼部高孔渗区，井组所处位置孔隙度 0.7%~0.9%，渗透率 $(0.01 \sim 0.03) \times 10^{-3} \mu\text{m}^2$ ，单井产量 $200 \sim 400 \text{ m}^3/\text{d}$ ，并且由于沿背斜轴部向南孔隙度、渗透率减小，南部的井单井日产气量相对更低。SX 010 井组位于西南部，各井的产气量低于 $200 \text{ m}^3/\text{d}$ ，与煤层裂缝不发育、孔渗小有关。

6 结 论

a. 柿庄北地区野外裂缝观察表现出较好的共轭剪裂缝特征，优势走向为 NW 与 NEE 向，3 号煤层中褶皱轴部走向为近南北向，依据构造形迹确定燕山期构造应力场以 SEE105°-NWW285° 挤压为主。

b. 根据水力加砂压裂资料进行井点地应力计算，通过古地磁定向及声速各向异性确定现今最大水平主应力为 NE55°-SW235°。将煤层构造形态与地表起伏作为主要影响因素，建立地质模型并对现今地应力场进行数值模拟，结果与单井地应力数值误差小，模拟精度较高。

c. 煤层变形以弹性阶段为主，以燕山期及现今

地应力场模拟结果为基础，利用弹性力学理论对柿庄北3号煤层裂缝参数进行计算分析，裂缝孔隙度、渗透率普遍较小，分布不均。整体来说，孔隙度、渗透率分布规律相似，中部背斜区>中部平缓区>东部单斜区>中部向斜区>西部地区。

d. 柿庄北3号煤层裂缝数值模拟结果与实际测试结果误差小，模拟可信度高。单井产气量高的地区裂隙较发育，这可作为煤层气开发井网部署和开发动态分析的依据。

参考文献

- [1] 张胜利,李宝芳. 煤层割理的形成机理及在煤层气勘探开发评价中的意义[J]. 中国煤田地质, 1996, 8(1): 72–77.
ZHANG Shengli, LI Baofang. Mechanism of coalbed cleat and its significance in evaluation of coalbed methane exploration and development [J]. Coal Geology of China, 1996, 8(1): 72–77.
- [2] 刘洪林,李贵中,王广俊,等. 沁水盆地煤层气地质特征与开发前景[M]. 北京:石油工业出版社, 2009: 33–37.
- [3] 叶建平,史保生,张春才. 中国煤储层渗透性及其主要影响因素[J]. 煤炭学报, 1999, 24(2): 118–122.
YE Jianping, SHI Baosheng, ZHANG Chuncai. Coal reservoir permeability and its controlled factors in China[J]. Journal of China Coal Society, 1999, 24(2): 118–122.
- [4] 李火银,岛田莊平. 构造应力对日本钏路煤田煤层气体渗透率的影响[J]. 中国煤层气, 2005, 2(1): 18–21.
LI Huoyin, SOHEI Shimada. Impact of tectonic stress on gas permeability of a coal seam at Kushiro coalfield, Japan[J]. China Coalbed Methane, 2005, 2(1): 18–21.
- [5] 孙立东,赵永军. 沁水盆地煤储层渗透性影响因素研究[J]. 煤炭科学技术, 2006, 34(10): 74–78.
SUN Lidong, ZHAO Yongjun. Research on permeability influence factors of coal deposit layer in Qinshui basin[J]. Coal Science and Technology, 2006, 34(10): 74–78.
- [6] 刘畔,王云. 山西沁水盆地煤层气产业发展规划研究[J]. 中国煤层气, 2008, 5(2): 6–10.
LIU Ye, WANG Yun. Study on the development program of CBM/CMM industry in Shanxi Qinshui basin[J]. China Coalbed Methane, 2008, 5(2): 6–10.
- [7] 叶建平,张兵,WONG S. 山西沁水盆地柿庄北区块3#煤层注入埋藏CO₂提高煤层气采收率试验和评价[J]. 中国工程科学, 2012, 14(2): 38–44.
YE Jianping, ZHANG Bing, WONG S. Test of and evaluation on elevation of coalbed methane recovery ratio by injecting and burying CO₂ for 3# coal seam of north section of Shizhuang, Qinshui basin, Shanxi[J]. Engineering Sciences, 2012, 14(2): 38–44.
- [8] 戴俊生,汪必峰,马占荣. 脆性低渗透砂岩破裂准则研究[J]. 新疆石油地质, 2007, 28(4): 393–395.
DAI Junsheng, WANG Bifeng, MA Zhanrong. Research on cracking principles of brittle low permeability sands[J]. Xinjiang Petroleum Geology, 2007, 28(4): 393–395.
- [9] 申卫兵,张保平. 不同煤阶煤岩力学参数测试[J]. 岩石力学与工程学报, 2000, 19(增刊1): 860–862.
SHEN Weibing, ZHANG Baoping. Testing study on mechanical parameters of coal[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2000, 19(SI): 860–862.
- [10] WILLIS R J, WATANABE K, TAKAHASHI H. Progress toward a stochastic rock mechanics model of engineered geothermal systems[J]. Journal of Geophysical Research, 1996, 101: 17481–17496.
- [11] 秦勇,姜波,王继尧,等. 沁水盆地煤层气构造动力条件耦合控藏效应[J]. 地质学报, 2008, 82(10): 1355–1362.
QIN Yong, JIANG Bo, WANG Jiyao, et al. Coupling control of tectonic dynamical conditions to coalbed methane reservoir formation in the Qinshui basin, Shanxi, China [J]. Acta Geologica Sinica, 2008, 82(10): 1355–1362.
- [12] 侯明勋,葛修润,王水林. 水力压裂法地应力测量中的几个问题[J]. 岩土力学, 2003, 24(5): 841–844.
HOU Mingxun, GE Xiurun, WANG Shulin. Discussion on application of hydraulic fracturing method to geostress measurement[J]. Rock and Soil Mechanics, 2003, 24(5): 841–844.
- [13] 侯守信,田国荣. 古地磁岩心定向及其在地应力测量上的应用[J]. 地质力学学报, 1999, 5(1): 90–96.
HOU Shouxin, TIAN Guorong. Palaeomagnetic orientation of cores and its applications for insitu stress measurements[J]. Journal of Geomechanics, 1999, 5(1): 90–96.
- [14] 戴俊生,李理. 油区构造分析[M]. 东营:中国石油大学出版社, 2011: 171–173.
- [15] 管俊芳,侯瑞云. 煤储层基质孔隙和割理孔隙的特征及孔隙度的测定方法[J]. 华北水利水电学院学报, 1999, 20(1): 23–27.
GUAN Junfang, HOU Ruiyun. Coal pore properties of matrix & cleat and their porosity measurement methods[J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power, 1999, 20(1): 23–27.
- [16] 孙梦迪,于炳松,朱华,等. 山西沁水盆地南部3号煤层储集空间特征与变质程度的关系[J]. 中国煤炭地质, 2011, 23(11): 31–35.
SUN Mengdi, YU Bingsong, ZHU Hua, et al. Relationship between No.3 coal seam reservoir space characteristics and degree of coal metamorphism in southern Qinshui basin, Shanxi[J]. Coal Geology of China, 2011, 23(11): 31–35.
- [17] 邢力仁. 沁水盆地柿庄南区块煤层气有利储层预测[D]. 北京:中国地质大学, 2014: 19.
- [18] 傅雪海,姜波,秦勇,等. 用测井曲线划分煤体结构和预测煤层渗透率[J]. 测井技术, 2003, 27(2): 140–143.
FU Xuehai, JIANG Bo, QIN Yong, et al. Classification of coalbody structure and prediction of coal reservoir permeability with log curves[J]. Well Logging Technology, 2003, 27(2): 140–143.
- [19] 刘升贵,彭智高,王振彪,等. 沁水盆地煤储层参数影响产气量数值模拟[J]. 辽宁工程技术大学学报(自然科学版), 2014, 33(10): 1302–1305.
LIU Shenggui, PENG Zhigao, WANG Zhenbiao, et al. Numerical simulation of reservoir parameters influence on gas production in Qinshui basin[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2014, 33(10): 1302–1305.

(责任编辑 晋香兰)